

В статье рассматриваются особенности автотрансформаторов типа KWF-125002 и KWF-125001, анализируются причины их выхода из строя, а также приводится информация о способах модернизации этих трансформаторов с целью повышения надежности их работы.

Опыт модернизации и послеаварийных восстановительных ремонтов трансформаторов

Валерий Шкрум, Виктор Ренёв НИЦ «ЗТЗ-СЕРВИС», г. Запорожье



Снижение надежности работы трансформаторов

Парк силовых трансформаторов с напряжением 110-750 кВ на Украине и в других странах СНГ характеризуется значительным возрастом – около половины оборудования находится в эксплуатации более 30 лет.

После 25-30 лет эксплуатации надежность работы трансформаторов снижается по нескольким причинам:

- происходит деструкция витковой изоляции из-за воздействия температуры, увлажнения и продуктов старения масла, что снижает стойкость трансформатора к воздействию коротких замыканий,
- происходит износ основных узлов: обмоток, вводов, регуляторов напряжения и элементов системы охлаждения (единственным элементом, который практически не изнашивается, является магнитопровод),
- возрастают нагрузки в энергосистеме, что в первую очередь сказывается на трансформаторах, находящихся в эксплуатации длительное время.

Частично надежность работы поддерживается за счет выполнения ремонтов с сушкой и очисткой изоляции, подпрес-

совкой обмоток и заменой масла и дефектных узлов. Во многих случаях надежность работы можно увеличить за счет модернизации, которую целесообразно выполнять при капитальных ремонтах.

Приобретение и установка новых трансформаторов требует больших материальных затрат, поэтому экономически более выгодным является проведение капитальных ремонтов с модернизацией конструкции и устранением причин, приводящих к снижению работоспособности трансформаторов.

Основные условия для проведения эффективной модернизации:

- анализ причин отказов (повреждений, аварийных отключений) трансформаторов данного типа в процессе эксплуатации,
- анализ условий эксплуатации: нагрузки, температурный режим, воздействие коммутационных и грозовых перенапряжений, короткие замыкания в сети и другое (условия эксплуатации учитываются при проектировании трансформаторов, но после 25-30 лет работы они вполне могут измениться),
- анализ конструкции с учетом имевшихся проблем эксплуатации трансформаторов аналогичного типа (часть необходимых конструктивных данных можно получить при внутреннем осмотре),
- оценка технического состояния основных узлов трансформатора после длительной эксплуатации.

НИЦ «ЗТЗ-Сервис» в течение последних 25 лет выполнил более 100 ремонтов с модернизацией различных типов оборудования: блочных трансформаторов 750 кВ, шунтирующих реакторов 400-750кВ и автотрансформаторов (далее АТ) связи 330-500 кВ, в том числе однофазных АТ 210 МВА 400/230 кВ производства завода TRO (Германия), установленных на энергообъектах Болгарии.

В данной публикации освещен опыт модернизации указанных АТ, выполненной в связи с их высокой повреждаемостью.

Характеристика модернизированных АТ 210 МВА 400/230 кВ

На момент проведения модернизации в Болгарской энергосистеме более 25 лет эксплуатировались 4 группы однофазных АТ 210 МВА, 400/230/31.5 кВ. Каждая группа состоит из 3 рабочих и одного резервного автотрансформатора, который с помощью системы выключателей может быть включен вместо любой фазы, которую необходимо вывести из эксплуатации, например, для ремонта.

Регулирование напряжения под нагрузкой производится на стороне СН в пределах от 191 до 271 кВ с помощью регулятора напряжения на ± 13 положений (номинальным является 14-ое положение).

Для компенсации реактивной мощности линий 400 кВ на стороне НН в закрытом шинном мосте установлен трехфазный компенсирующий реактор 35 кВ мощностью 50 МВАр (обычно шунтирующие реакторы устанавливаются в линии ВН). В результате реактивная мощность линий 400кВ «прокачивается» через автотрансформаторную группу.

Для обеспечения требуемых режимов работы сети 400 кВ реакторы 35 кВ коммутируются несколько раз в сутки. На стороне НН установлены также конденсаторные батареи емкостью 0.5 мкФ (для снижения уровня перенапряжений при коммутации компенсирующего реактора).

Регулировочная обмотка и регулятор напряжения защищены от импульсных и коммутационных перенапряжений двумя вентильными разрядниками, для установки которых предусмотрен специальный трехзажимный ввод 220 кВ.

Эксплуатируются АТ двух типоразмеров: типа KWF-125002 разработки 1969 года и типа KWF-125001 разработки 1975 года, которые имеют несколько конструктивных отличий (см. раздел ниже). Первоначально на каждой ПС была установлена одна группа конкретного типа. В процессе эксплуатации делались перестановки, в результате чего на некоторых ПС группа стала состоять из АТ разных типов.

Электрическая схема соединения обмоток АТ типа KWF-125001 представлена на **рис.1**, типа KWF-125002 – на **рис.2**. Сведения об отказах АТ за период эксплуатации до модернизации приведены в **табл.1** (KWF-125001) и в **табл.2** (KWF-125002).

Анализ конструкции, условий эксплуатации и внутренних осмотров Анализ конструкции

Конструкция АТ 210 МВА 400/220/31.5 кВ отличается большей сложностью: в одном баке размещены как основной автотрансформатор, так и регулировочный трансформатор (фак-

тически вольтодобавочный), а также регулятор напряжения класса 220 кВ. Все обмотки размещены на двух параллельных стержнях (см. электрические схемы соединения обмоток на **рис.1** и **рис.2**). На **рис.1** и **рис.2** обозначено:

- ПО, ОО, НН – обмотки автотрансформатора (последовательная, общая и низкого напряжения);
- РО, ВО – обмотки регулировочного трансформатора (регулирующая, возбуждающая);

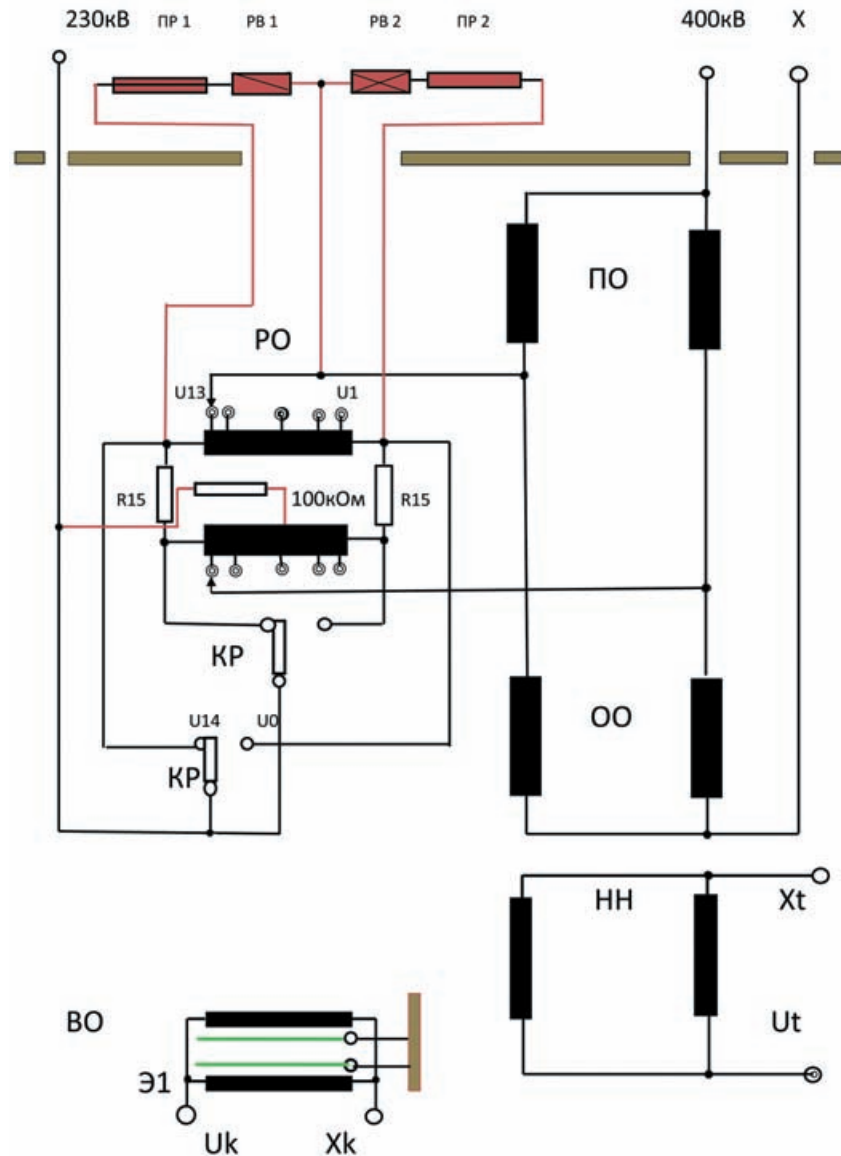


Рис.1

- Э1, Э2 – электростатические экраны;
- U1..... U13 – отпайки регулировочной обмотки (контакты регулятора);
- KP, U0, U14 – контакты реверсора;
- U – линейный зажим 230 кВ;
- PB1, PB2 – вентильные разрядники 36 кВ схемы защиты обмоток РО;
- PP1, PP2 – высоковольтные предохранители (30 кВ, 16 А).

После нескольких аварий производство АТ типа KWF-125002 было прекращено, а в следующее типоразмерное

KWF-125001 заводские конструкторы внесли следующие существенные изменения:

- слоевая обмотка 400 кВ была заменена на обмотку переплетенного типа,
- все главные изоляционные промежутки выполнены маслобарьерного типа (в типоразмере KWF-125002 некоторые промежутки были бумажно-масляного типа);
- бак выполнен колокольного типа (с нижним разъемом);
- в промежутке между регулировочной обмоткой и заземлёнными экранами Э1 установлены электростатические экраны Э2, подключенные к точкам соединения последовательной и общей обмоток;
- применен регулятор напряжения с усиленной контактной системой;
- устранен резистор 100 кОм, который в типоразмере KWF-125002 связывал среднюю отпайку регулировочной обмотки с линейным выводом 230 кВ в момент реверсирования;
- изменена схема подключения защитных резисторов 15 Ом.

Как следует из **табл.1**, конструктивные изменения, выполненные заводом ТРО, не привели к снижению повреждаемости АТ. После ремонтов, в том числе даже на заводе-изготовителе, АТ повреждались повторно.

Анализ особенностей эксплуатации

Анализ условий эксплуатации позволяет отметить следующие особенности:

- примерно 50% времени АТ работают в номинальном положении регулятора напряжения (14-е положение), когда регулировочный трансформатор работает на холостом ходу с питанием от обмотки НН основного автотрансформатора,
- остальное время АТ работают в 13-ом положении регулятора, когда включена только одна ступень регулировочной обмотки, через которую протекает 50% тока нагрузки сети 230 кВ (примерно 1350 А),
- переключения из 13 в 14-е положение и обратно выполняются несколько раз в год,
- повреждение обоих резисторов R15 происходит только при работе АТ в 13-ом положении,
- реакторы на стороне НН коммутируются довольно часто (несколько раз в сутки в зависимости от условий работы сетей 400 кВ).

Шинный мост на стороне НН с установленными конденсаторами и реактором 50 МВАр представляет собой емкостно-индуктивный колебательный контур, в котором при коммутации реактора элегазовыми выключателями возникают перенапря-

жения значительной величины (до $3U_{\phi}$, что составляет 50 - 55 кВ), которые приводят к перекрытию изоляторов шинных мостов 31.5кВ и передаются на регулировочную обмотку.

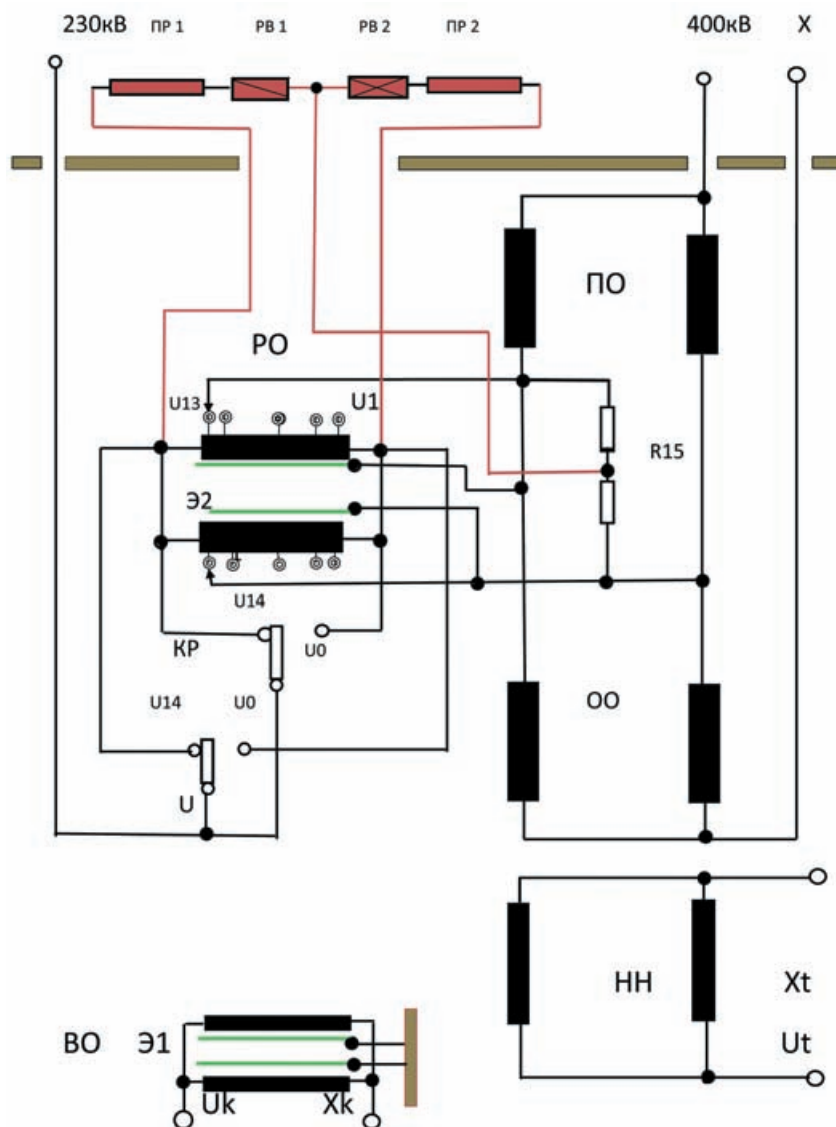


Рис.2

Для оценки перенапряжений, которые могут воздействовать на обмотку РО со стороны 230 кВ, НИЦ «ЗТЗ-Сервис» на одном из отключенных АТ выполнил измерения при низком импульсном напряжении при всех положениях регулятора. Эти измерения показали, что наибольшее импульсное напряжение на обмотке (действующее также между контактами реверсора), возникает при работе в 13-ом или в 14-ом положениях регулятора. Если включены 3 - 4 ступени регулировочной обмотки, то напряжение примерно в 1.5 раза ниже.

Проведенный анализ показал, что при коммутациях различного вида, а также при грозовых воздействиях, напряжение на регулировочной обмотке в условиях эксплуатации может достигать значительной величины, что подтверждают и зафиксированные случаи срабатывания и повреждения разрядников и перегорания предохранителей.

Таблица 1

№ п/п	Завод. №	НР, лет	Характерные особенности аварийного процесса	Пол. РПН
1	641881	0.3	отключен ДФЗ после КЗ на стороне НН, разрушены вводы НН и ввод нейтрали	13
2	641881	12*	отключен ГЗ и ДФЗ, поврежден разрядник 220 кВ	14
3	641881	2.5	отключен ДФЗ, поврежден один из разрядников РО, перегорели резисторы 15 Ом, оплавлены контакты реверсора	13
4	641882	15	ухудшение контактов реверсора	13
5	641885	3	отключен ГЗ и ДФЗ, регулятор выброшен из бака	13
6	641886	8	отключен ГЗ, сгорел предохранитель в схеме защиты РО	14
7	641886	1	отключен ГЗ, перегорели предохранители схемы защиты РО, оплавлены контакты реверсора	14
8	641913	6	отключен ГЗ при переключении из 14-ого в 15-ое положение, оплавлены контакты реверсора	14
9	641913	4*	отключен ГЗ, перегорели резисторы 15 Ом и оба предохранителя	14
10	641913	1*	отключен ДФЗ при включении со стороны 220 кВ	13
11	641913	1*	отключен ДФЗ из-за двухфазного КЗ на стороне НН	13
12	641913	0*	отключен ГЗ при включении со стороны 220 кВ, пробой обмотки НН на землю	13
13	641915	19	отключен ГЗ и ДФЗ, перегорели резисторы 15 Ом, разрушен один из разрядников РО	14
14	641922	11	отключен ГЗ	13
15	641922	3*	отключен ГЗ и ДФЗ при КЗ в линии 220 кВ,	14
16	641922	1*	отключен ГЗ	13

* - после капремонта или предыдущего отказа, НР - наработка, ГЗ - газовая защита, ДФЗ - дифференциальная защита, РО - регулировочная обмотка

Анализ внутренних осмотров АТ после повреждений и аварийных отключений

Проведенный анализ повреждений АТ позволил сделать следующие выводы:

1. Зафиксированные в **табл.1** и **табл.2** три случая повреждения резисторов 15 Ом стали причиной отключения АТ газовой защитой,

2. Причиной повреждения резисторов можно считать то, что они включены последовательно в схему защиты обмоток РО от перенапряжений. Обнаруженные фрагменты нихромовой проволоки (длиной в один виток), из которой намотаны резисторы, свидетельствуют о пробое между витками резистора при импульсных перенапряжениях. Дальнейшее раз-

рушение резисторов 15 Ом могло происходить из-за протекания через резисторы тока рабочей частоты: сопровождающего тока разрядника или тока, вызванного неодновременностью моментов переключения параллельных контактов контактора и реверсора (АТ типа KWF-125 002) или из-за неполной симметрии параллельных обмоток ОО и ПО (АТ типа KWF-125001). Длительное протекание тока через места повреждений изоляции резисторов 15 Ом приводило к выделению большого количества продуктов разложения масла, которые откладывались на поверхностях изоляции, обмоток и даже стенках бака (обнаружено при ремонте нескольких АТ типа KWF-125001). Затем наступало полное разрушение одного или двух резисторов, что приводило к выходу из строя схемы защиты обмотки РО от перенапряжений.

Таблица 2

№ п/п	Завод. №	НР, лет	Характерные особенности аварийного процесса	Пол. РПН
1	641535	0.3	отключен ДФЗ	11
2	641535	10*	отключен ГЗ и ДФЗ при грозе, повреждена обмотка 220 кВ	11
3	641435	20	отключен вручную из-за дефектов контактов реверсора	11
4	641437	20	отключен вручную из-за дефектов контактов реверсора	11
5	641426	6	отключен ДФЗ из-за повреждения ввода 400кВ	13
6	641426	13*	отключен ГЗ и ДФЗ, поврежден один из разрядников РО, перегорели резисторы 15 Ом	14

* - после капремонта или предыдущего отказа, НР - наработка, ГЗ - газовая защита, ДФЗ - дифференциальная защита, РО - регулировочная обмотка

И если в АТ типа KWF-125002 оставалась без защиты от перенапряжений одна из обмоток РО, то в АТ типа KWF-125001 без защиты оставались обе обмотки. Так как ограничение перенапряжения на одной из обмоток РО одновременно снижает перенапряжение и на другой (обмотки расположены на общем магнитопроводе и при этом транспонированы по обеим стержням регулировочного трансформатора), то АТ типа KWF-125002 оказались более надёжными.



Обнаружить пробой или дуговое замыкание между витками резистора 15 Ом, находящегося в баке АТ под потенциалом сети 230 кВ, можно было по хроматографическому анализу растворённых в масле газов, который выполнялся довольно редко (не чаще одного раза в год). Необходимо также отметить, что в АТ типа KWF-125001 перегорание одного из резисторов 15 Ом неизбежно приводит к повреждению второго резистора, так как ток через него возрастает вдвое,

3. При воздействии перенапряжений со стороны СН газовыделение могли вызывать и искровые пробои изоляционного промежутка между контактами реверсора U0 и U14 (наиболее опасной является ситуация после перегорания резистора 15 Ом или предохранителя),

4. Наибольшая нагрузка на контакты реверсора возникает при переключении из 13-го положения в 14-е, так как при этом переключается напряжение не одной ступени, а всей обмотки РО. Это и приводит к подгоранию контактов реверсора токами перезаряда паразитных емкостей обмоток РО (обнаружено при внутреннем осмотре нескольких АТ),

5. Ещё одной причиной повреждений АТ можно считать частые коммутации реактора (не менее 1 раза в сутки) в шинном мосте 31,5 кВ. Возникающие при этом коммутационные перенапряжения приводили к перекрытию изолято-

ров шинпровода с ухудшенной изоляцией, что приводило к однофазному либо двухфазному замыканию на землю (несколько десятков таких перекрытий обнаружено на трех подстанциях). Подобные случаи отмечены в табл.1 (строки 1, 11 и 12).

Объём модернизации АТ

Для устранения причин отказов была выполнена модернизация в следующем объеме:

- установлены защитные резисторы 15 Ом новой конструкции с повышенной электрической прочностью межвитковой изоляции, при этом каждый резистор защищен ограничителем перенапряжений,
- изменена схема подключения электростатических экранов Э2 – каждый экран подключен к одному из концов регулировочной обмотки (см. рис.2),
- увеличена электрическая прочность изоляционного промежутка между контактами реверсора – установлены контакты без острых деталей и барьер из электрокартона,
- вентильные разрядники в схеме защиты регулировочных обмоток заменены на ограничители перенапряжений, что улучшило защиту обмоток РО от коммутационных перенапряжений.

Выводы

Анализ конструкции, условий эксплуатации и внутренних осмотров поврежденных автотрансформаторов связи 210 МВА 400/230 кВ позволил выявить основные причины отказов и разработать эффективные меры по модернизации автотрансформаторов.

Результаты эксплуатации нескольких модернизированных автотрансформаторов положительные – аварийные отключения не происходят уже более 15 лет.

По мнению авторов, приведенный в статье пример решения проблемы при эксплуатации автотрансформаторов 210 МВА 400/230 кВ мог быть полезен для эксплуатационного персонала энергообъектов и предприятий, занимающихся диагностикой и ремонтом трансформаторов на Украине и в других странах СНГ.

От редакции:

Как пишут авторы статьи, в США много лет существует компания Doble Engineering Company, клиенты которой (представители эксплуатирующих организаций) собираются на ежегодные конференции. На таких конференциях они делятся опытом эксплуатации электрооборудования, обсуждают имеющиеся проблемы и методы их решения, и могут получить советы и рекомендации от тех специалистов, которые уже справились с подобными проблемами.

В связи с этим редакция предлагает использовать страницы журнала «Электрик. Международный электротехнический журнал» как площадку по обмену опытом в масштабах стран СНГ, как это делает компания Doble Engineering Company.

Обращаемся к представителям эксплуатирующих организаций с просьбой поделиться своим опытом эксплуатации электрооборудования.